

論文 混和材を大量に使用したコンクリートと比較したカーボンリサイクル・コンクリートの物性および耐久性

近藤 祥太*1・鶴田 孝司*2・宮原 茂禎*3・大脇 英司*4

要旨：ポルトランドセメントを使用せずに高炉スラグ微粉末を主な結合材とし、さらに CO₂ を吸収・固定した炭酸カルシウム (CCU 材料) を添加したカーボンリサイクル・コンクリートを開発し、社会実装を進めている。本稿では、カーボンリサイクル・コンクリートの物性および耐久性について、土木学会で指針案が示されている混和材を大量に使用したコンクリートと比較した。その結果、各種物性や耐久性は、混和材を大量に使用したコンクリートの性能と比較して遜色ないものであり、指針案を準用できる可能性が高いことが分かった。
キーワード：混和材、高炉スラグ、CCU、炭酸カルシウム、物性、耐久性

1. はじめに

ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材で大量に置換することは、コンクリートの製造に関わる CO₂ 排出量を削減する代表的な手段の一つである¹⁾。2018 年に土木学会「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針 (案) (以下、指針案) が発刊され²⁾、脱炭素社会の実現に向け、普及が期待されている。指針案が対象とする粉体構成の範囲を図-1 に示す。著者らは、ポルトランドセメントの使用を“ゼロ”とし、高炉スラグ微粉末を主な結合材とする環境配慮コンクリート (以下、セメント・ゼロ型、図-1 : ■) を開発し、指針案を活用して社会実装を進めている³⁾。

他方、排ガス等から分離・回収した CO₂ をセメント原料やコンクリート材料等として活用する CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) 技術の開発が進められている⁴⁾。著者らは、CO₂ を吸収・固定した炭酸カルシウム (以下、CCU-CaCO₃) をセメント・ゼロ型に添加し、CO₂ の排出削減に加えて CO₂ を資源として活用し、さらに CO₂ を長期間に亘り安定して固定できるカーボンリサイクル・コンクリートを開発した⁶⁻⁷⁾。現時点では CCU-CaCO₃ を用いたコンクリートの規準・規格類はなく、社会実装の加速に向けてその整備が望まれる。

本研究では、カーボンリサイクル・コンクリートの粉体構成が指針案の対象とするコンクリートの粉体構成に近いことに着目し (図-1)、カーボンリサイクル・コンクリートの物性や耐久性を混和材を大量に使用したコンクリートの場合と比較し、指針案のカーボンリサイクル・コンクリートへの適用可能性について検討した結果を報告する。

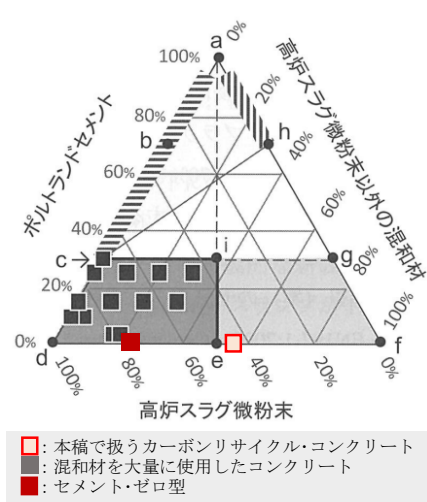


図-1 カーボンリサイクル・コンクリートの粉体構成 (文献 2) に加筆

なお、著者らは先行してカーボンリサイクル・コンクリートの基本的な性状について検討し、指針案を適用できる可能性が高いことを報告している⁶⁾。本稿で使用した CCU-CaCO₃ は、先行報告⁶⁾で用いたものとは製造プロセスが異なるものであり、品質の異なる CCU-CaCO₃ を用いた場合の性状確認も兼ねた。

2. 使用材料および配合

2.1 使用材料

カーボンリサイクル・コンクリートの使用材料を表-1 に、CCU-CaCO₃ の品質を表-2 に示す。比表面積と密度は JIS R 5201 に準拠して測定した。化学組成は JIS R 5204 に準拠し、CaCO₃ 純度は JIS R 5210 に示される少量混合成分としての石灰石を対象とした算出方法を用

*1 大成建設 (株) 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室 研究員 修士 (工学) (正会員)
*2 大成建設 (株) 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室 研究員 修士 (理学)
*3 大成建設 (株) 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室 主任研究員 博士 (工学) (正会員)
*4 大成建設 (株) 技術センター T-eConcrete 実装プロジェクトチーム 名誉研究員 博士 (工学) (フェロー会員)

いた。湿分は JIS A 6201, メチレンブルー吸着量は JCAS I-61 に規定されるフライアッシュを対象とした方法を用いた。鈹物組成は粉末 X 線回折法による同定結果である。カルシウム系の刺激材には相当する規格がないが、原料は従来のセメントやコンクリートにおいて使用実績がある工業的に製造された粉体である。

表-2 には参考までに CCU-CaCO₃ と化学組成や鈹物組成が類似するコンクリート用石灰石微粉末に対する品質規格 (案)⁸⁾ に規定される全項目を併記した。使用した CCU-CaCO₃ の品質はいずれも参考の規格値を満足した。

2.2 配合

カーボンリサイクル・コンクリートの配合を表-3 に示す。水結合材比は 0.55, 0.47, 0.40 の 3 水準 (以下, CC55, CC47, CC40) とし, 物性や耐久性について評価した。また, CC55-Ad3 は初期の強度発現性を向上させるため, CC-55 に亜硝酸塩と硝酸塩を主成分とする硬化促進剤 (JIS A 6204) を粉体に対して 3.0% 添加した配合である。

3. 試験方法

3.1 強度特性

カーボンリサイクル・コンクリートの強度特性として, 圧縮強度, 引張強度, ヤング係数, ポアソン比について試験を実施した。圧縮強度は標準養生した試験体を対象に材齢 28 日において JIS A 1108 に従って求めた。また材齢 28 日における圧縮強度と引張強度, ヤング係数, ポアソン比の関係を評価した。引張強度は JIS A 1113 に準拠して求めた。ヤング係数は JIS A 1149 に準拠し, ヤング係数測定時に試験体の円周方向にひずみゲージを追加して求めた。

3.2 劣化抵抗性

カーボンリサイクル・コンクリートの劣化抵抗性として, 凍害に対する抵抗性を凍結融解試験で評価し, アルカリシリカ反応に対する抵抗性を「無害でない」骨材を用いてモルタルバー法で評価した。凍結融解試験は, JIS A 1148 (A 法) に準拠して実施した。また, φ100×200mm 円柱供試体の切断面を用いてリニアトラバース法により硬化後の空気量と気泡間隔係数を求めた。モルタルバー法は JIS A 1146 に準拠した。JIS A 1145 (化学法) にて「無害でない」と判定された細骨材と表-1 に示す細骨材を 3:7 の割合で混合して使用した。使用材料に含まれる Na₂O_{eq} 量を考慮して Na₂O_{eq} 量が結合材の 1.2% となるように NaOH 溶液を添加し, JIS A 1146 の配合に基づき角柱供試体を作製した。JIS A 1146 に示された規格通りの配合物であるモルタル, セメントを高炉セメント B 種に変更したモルタル, セメントを各種カーボンリサ

表-1 使用材料

名称・規格	記号	仕様・物性など
水 JIS A 5308	W	上水道水
高炉スラグ微粉末 JIS A 6206	BFS	高炉スラグ微粉末 4000, 密度 2.89g/cm ³ , 比表面積 4470cm ² /g
刺激材	St	カルシウム系化合物, 主成分:Ca(OH) ₂ , 密度 2.89g/cm ³
炭酸カルシウム	CCU-CaCO ₃	表-2 に記載
細骨材 JIS A 5005	S	君津産山砂と石灰岩砕砂の混合砂, 表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 2.0%
粗骨材 JIS A 5005	G	砕石 2005, 青梅産硬質砂岩, 表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.7%
化学混和剤 JIS A 6204	Ad1	高性能減水剤, ポリカルボン酸エーテル系
	Ad2	減水剤, リグニンスルホン酸系とオキシカルボン酸系の複合体
	Ad3	硬化促進剤
	Ad4	AE 剤

表-2 使用した炭酸カルシウムの品質

		CCU-CaCO ₃	参考規格値*
比表面積	(cm ² /g)	4130	2500 以上
密度	(g/cm ³)	2.67	—
化学組成	MgO	0.32%	5%以下
	SO ₃	0.26%	0.5%以下
	Al ₂ O ₃	0.12%	1.0%以下
CaCO ₃ 純度		98.0%	90%以上
湿分	—	0.1%	1.0%以下
メチレンブルー吸着量	mg/g	0.02	1.0 以下
鈹物組成	XRD	calcite のみ	

*JCI-SLP コンクリート用石灰石微粉末品質規格 (案)⁸⁾

表-3 コンクリートの配合

配合名	W/B	単位量 (kg/m ³)					
		W	粉体:P			骨材	
			結合材:B		CCU-CaCO ₃	S	G
			BFS	St			
CC55	0.55	175	263	55	260	624	810
CC47	0.47	175	309	65	260	602	840
CC40	0.40	151	312	66	260	627	845
CC55-Ad3	0.55	175	263	55	260	624	810

イクル・コンクリートの粉体 (CC55, CC47, CC55-Ad3) に変更したモルタルの計 5 種類を作製した。材齢 2 日で脱型した後, 温度 40°C で湿気箱に貯蔵し, 所定の材齢で膨張率を測定した。

3.3 物質の透過に対する抵抗性

カーボンリサイクル・コンクリートの物質の透過に対する抵抗性として, 中性化に対する抵抗性を促進中性化

試験、水分の浸透に対する抵抗性を水分浸透試験、塩害に対する抵抗性を塩化物イオンの拡散係数試験により評価した。促進中性化試験は JIS A 1153 に準拠した。水分浸透速度係数試験は、φ100×200mm の円柱供試体を用いて JSCE-G 582-2018 に準拠して実施した。脱型した試験体の底面から 25mm の位置で切断して下部を除去した後、20°C、RH60%環境下に 91 日間静置した。その後、円柱の柱面に防水シールを貼付し、切断面（φ100mm）を下、打込み面を上にしてほぼ垂直に設置し、試験体下部から 10mm の高さまで水に浸漬した。浸漬開始から 5, 24, 48 時間後に割裂し、水分検知剤を噴霧して呈色した部分を水分浸透深さとして求めた。水分浸透深さと浸漬時間の平方根の関係を直線で近似し、傾きを水分浸透速度係数とした。塩化物イオンの拡散係数試験は土木学会規準 JSCEG572-2018 に準拠した。材齢 28 日まで 20°C で水中養生した φ100×200mm 円柱供試体を用いた。両端を切除して長さを 150mm にした後、1 日間、室温 20°C、RH60%の室内に静置し、柱面と底面の 1 面（型枠側）をエポキシ樹脂で被覆した。樹脂の硬化後、1 日間、20°C の水中に浸漬した後、20°C で濃度 10% の NaCl 溶液中に移し、半年後に浸漬面から 10mm 間隔で切断して全塩化物イオン濃度を測定した。

3.4 ひび割れ抵抗性

カーボンリサイクル・コンクリートのひび割れ抵抗性に関連して乾燥収縮量、断熱上昇量を測定した。乾燥収縮量測定は JIS A 1129-2 に準拠した。断熱温度上昇量はマスブロックを用いた簡易法⁹⁾で測定した。断熱した型枠に 450mm 立方のコンクリートを打込み、コンクリートや環境の温度を計測して断熱温度上昇量に換算した。

4. 試験結果

4.1 強度特性

カーボンリサイクル・コンクリートの水結合材比と圧縮強度の関係を、指針案の対象とする混和材を大量に使用したコンクリートと比較して図-2 に示す。圧縮強度は結合材水比の増加（水結合材比の減少）とともに大きくなり、混和材を大量に使用したコンクリートと同様に、水結合材比を調節することで、圧縮強度について配合設計が可能であることを確認した。また CC55 に硬化促進剤を添加した CC55-Ad3 の材齢 28 日における圧縮強度は 40.9N/mm² であり、CC55 の圧縮強度（35.0N/mm²）と比較して 17%程度強度増進した。すなわち、水結合材比の減少に加え、硬化促進剤によっても材齢 28 日における圧縮強度は増進することが分かった。

圧縮強度と引張強度、ヤング係数、ポアソン比の関係をそれぞれ図-3、図-4、図-5 に示す。いずれの物性値についても混和材を大量に使用したコンクリートと

同様の分布範囲に位置し、コンクリート標準示方書に示される関係式¹⁰⁾を用いて推定できる可能性が高いことを確認した。

4.2 劣化抵抗性

カーボンリサイクル・コンクリートの凍結融解試験結果を図-6 に示す。試験終了時（300 サイクル）の相対動弾性係数は、いずれの配合についても 80%以上となり、中でも CC55 と CC47 はコンクリート標準示方書によると“凍害に対する照査不要”と判断される 90%以上を維持した。また硬化コンクリートの気泡間隔係数は、CC55 が 125μm、CC47 が 163μm、CC55-Ad が 192μm で各配合の凍結融解試験における相対動弾性係数の低下状況と整合しており、従来のコンクリート同様に気泡間隔係数の大小と凍結融解抵抗性には相関があることが分かった。一般的なコンクリートと比較すると気泡間隔係数が小さく、CCU-CaCO₃ を混和した影響が考えられるが、詳細なメカニズムは検証の必要がある。図-7 に示した気泡分布からも全ての配合で 0.1mm 以下の微細な空気が存在することが確認でき、特に良好な凍結融解抵抗性を示した CC55 と CC47 に多いことを確認した。

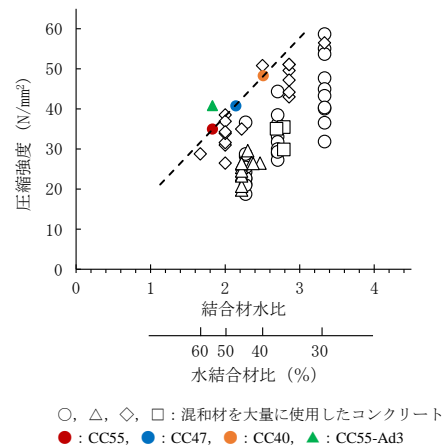


図-2 水結合材比と圧縮強度の関係
(文献 2) に加筆

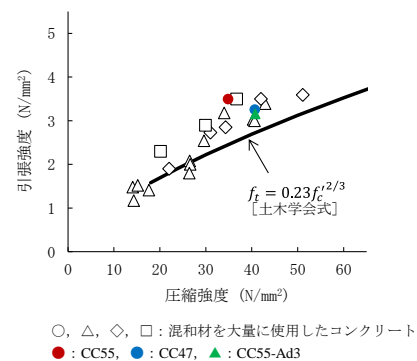


図-3 圧縮強度と引張強度の関係
(文献 2) に加筆

アルカリシリカ反応に対する抵抗性について、「無害でない」骨材を用いたモルタルバー法の試験結果を図-8に示す。普通ポルトランドセメントを用いたモルタルでは促進期間8週まで0.5%を超える大きな膨張を示した。また結合材に高炉セメントB種を用いた場合、供試体の膨張は抑制されるものの、促進期間8週以降で判定基準を超える膨張を示した。これに対してカーボンリサイクル・コンクリートの膨張率はいずれの配合にも高炉セメントB種よりも顕著に小さく、26週時点でも判定基準を下回った。指針案にて、一部の混和材を大量に使用したコンクリートは優れたASR抑制効果を有すると記載されているが²⁾、カーボンリサイクル・コンクリートは同様に、良好なASR抵抗性を有していることを確認した。

4.3 物質の透過に対する抵抗性

促進中性化試験により求めたカーボンリサイクル・コンクリートの中性化速度係数を、混和材を大量に使用したコンクリートと比較して図-9に示す。中性化速度係数は黒丸で示された普通ポルトランドセメントのみを結合材に用いたコンクリートより大きい、混和材を大量に使用したコンクリートの中性化速度係数の分布範囲の中では比較的小さい値であった。このことから、カーボンリサイクル・コンクリートは混和材を大量に使用したコンクリートと同様の中性化に対する抵抗性を有することが示唆された。

水分浸透試験結果と試験結果より求めたカーボンリサイクル・コンクリートの水分浸透速度係数Aおよび近似曲線の切片にあたる定数Bを図-10に示す。現状、混和材を大量に使用したコンクリートの水分浸透速度に関する検討事例は少ないが、高炉セメントA,B,C種の水分浸透速度を検討している既報¹⁾では、ほとんどの条件で水分浸透速度係数は、0.5mm/√時間を超える数値が報告されている。一方で、カーボンリサイクル・コンクリートの水分浸透速度係数は、0.040~0.161mm/√時間であり、各種高炉セメントと比較しても顕著に小さい値となった。先述した通りカーボンリサイクル・コンクリートの中性化速度はセメントのみのコンクリートよりも早くなるが、水の浸透が遅い場合には、中性化の進行が早くても鋼材腐食が速く進むことがないため、優れた水分浸透抵抗性は鋼材腐食の抑止に有効であると考えられる。

塩化物イオンの拡散係数試験の結果について、コンクリート表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を、混和材を大量に使用したコンクリートと比較して図-11に示す。表面塩化物イオン濃度は浸漬水のNaCl濃度の影響を強く受けるため、カーボンリサイクル・コンクリートの値は濃度10%の場合の混和材を大量に使用した

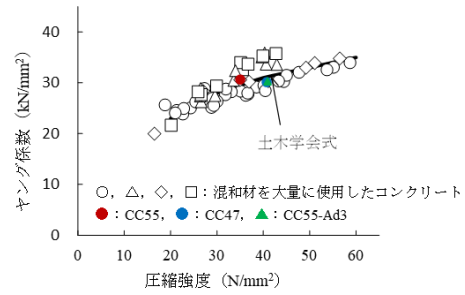


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係
(文献2)に加筆

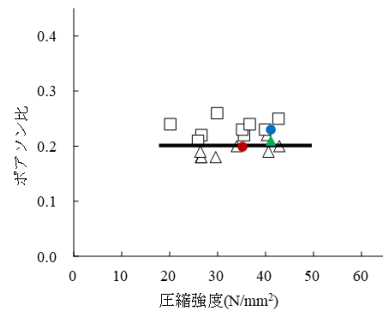


図-5 圧縮強度とポアソン比の関係
(文献2)に加筆

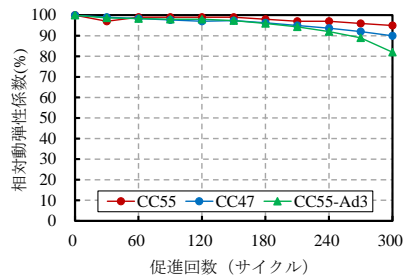


図-6 凍結融解抵抗性

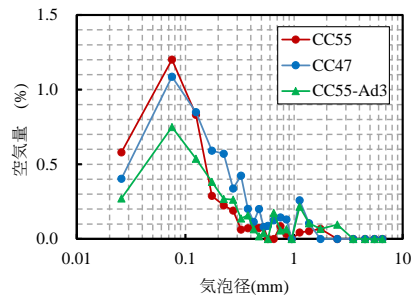


図-7 気泡径分布

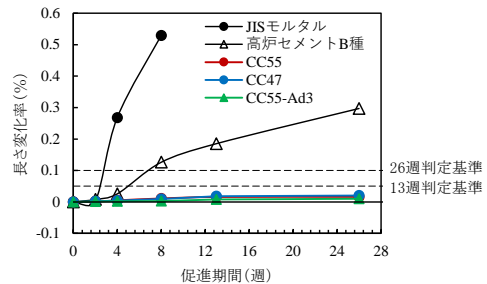


図-8 ASR抵抗性

コンクリートと同様であった。一方、拡散係数は混和材を大量に使用したコンクリートより僅かに大きい、ポルトランドセメントのみを結合材に用い、水結合材比が同等のコンクリートより顕著に小さくなった。このことから、カーボンリサイクル・コンクリートは従来のコンクリートより塩害抵抗性が高いことを確認した。

4.4 ひび割れ抵抗性

乾燥収縮量の試験結果について、配合条件から乾燥収縮量を推定する標準示方書の予測式による方法をカーボンリサイクル・コンクリートに適用して求めた計算値と比較し、図-12 に示す。図には混和材を大量に使用したコンクリートやポルトランドセメントのみのコンクリートの値も併記している。計算値はコンクリートの単位水量、セメント水比、骨材の吸水率と単位量、配合から求める単位容積質量を用いて得られる¹²⁾。ここではセメント水比を結合材水比に読み替えて適用した。カーボンリサイクル・コンクリートの場合、初期材齢において測定値が計算値より大きい傾向であるものの、混和材を大量に使用したコンクリートと同様に、乾燥収縮ひずみの予測値は実験値に対して概ね±50%の精度で予測されていることを確認した。本結果から、カーボンリサイクル・コンクリートの乾燥収縮ひずみは、実験値によらない場合、一般のコンクリートと同様にコンクリート標準示方書に示される予測式を適用できる可能性が高いものの、特に初期に測定値が計算値よりも高い傾向があるため、今後データ数を蓄積し検証する必要がある。

断熱温度上昇量は式(1)に示す関数で整理した。

$$Q(t) = Q_{\infty} [1 - \exp\{-r(t - t_{0,Q})\}] \quad (1)$$

ここで、 $Q(t)$ ：断熱温度上昇量 [°C]、 Q_{∞} ：終局断熱温度上昇量 [°C]、 r ：温度上昇速度に関する係数 [-]、 $t_{0,Q}$ ：有効材齢に関する係数 [d] である。

Q_{∞} と r について、カーボンリサイクル・コンクリートおよび混和材を大量に使用したコンクリートの測定値と一般的なセメントに関する値を図-13 に示す。カーボンリサイクル・コンクリートの Q_{∞} はJISに規定されるセメントより小さく混和材を大量に使用したコンクリートと同等の値を示した。 r は混和材を大量に使用したコンクリートより僅かに大きくなる傾向であったが、JISに規定されるセメントと同等であり温度の上昇速度も従来のセメントと同程度であることが分かった。このことから、カーボンリサイクル・コンクリートは混和材を大量に使用したコンクリートと同様に、JISに規定されるセメントよりも低発熱性に優れており、温度ひび割れの抵抗性が高いと考えられる。

5. まとめ

本稿では、カーボンリサイクル・コンクリートの物性や耐久性について、土木学会で指針が示されている「混

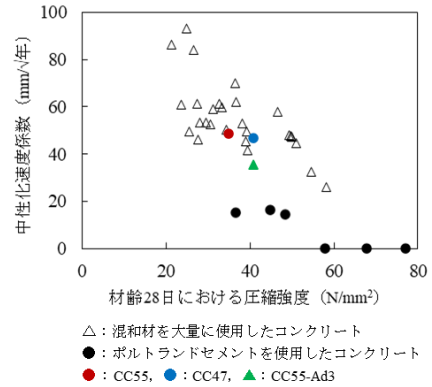
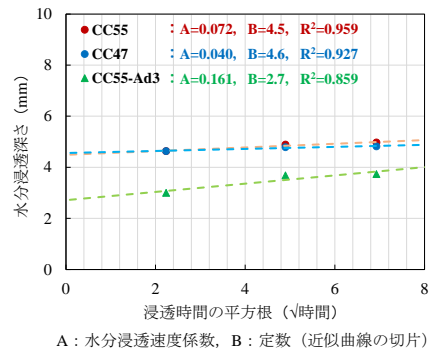


図-9 促進中性化速度係数 (文献2) に加筆



A: 水分浸透速度係数, B: 定数 (近似曲線の切片)

図-10 水分浸透速度係数

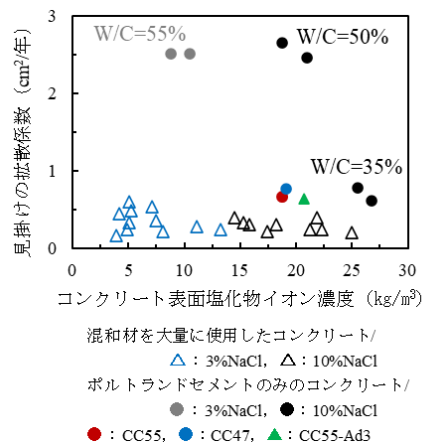


図-11 見掛けの拡散係数とコンクリート表面塩化物イオン濃度 (文献2) に加筆

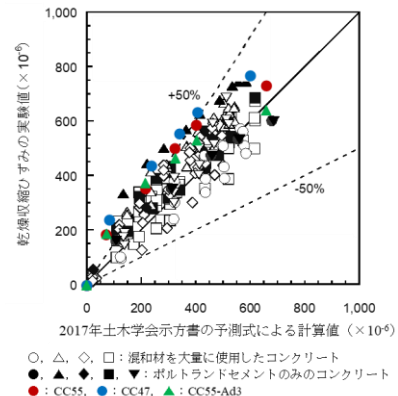


図-12 乾燥収縮ひずみ (文献2) に加筆

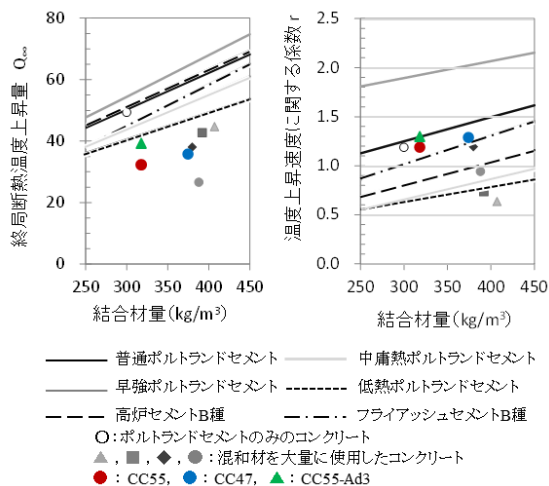


図-13 断熱温度上昇特性 (文献2) に加筆)

和材を大量に使用したコンクリート」と比較して報告した。表-4 に本稿で示したカーボンリサイクル・コンクリートの特徴を示す。ポルトランドセメントの使用を“ゼロ”とし、高炉スラグ微粉末を主な結合材とする環境配慮コンクリートに、さらに CCU-CaCO₃ を大量に添加したカーボンリサイクル・コンクリートの各種物性や耐久性は、異なる CCU-CaCO₃ を検討した先行報告⁷⁾同様に、混和材を大量に使用したコンクリートの性能と比較して遜色ないものであり、指針案を準用できる可能性が高いことが分かった。

CCU-CaCO₃ についても適切な規格や規準類を整備することが有用なコンクリートを製造するうえで重要であり、著者らも GI 基金事業等を通して種々の CCU-CaCO₃ に関する検討を進めている^{4,5)}。今後はカーボンリサイクル・コンクリートを製造するために適切な CCU-CaCO₃ についても精査していく必要がある。

参考文献

- 1) 石田哲也, 渡辺博志, 小林孝一, 大脇英司: 土木学会「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」の概要, コンクリート工学, 57巻, 7号, pp.475-480, 2019
- 2) 土木学会コンクリート委員会: 「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」, 土木学会, コンクリートライブラリー152, 2018
- 3) 大脇英司, 岡本礼子, 松元淳一, 渡邊悟士: 混和材を大量に使用したコンクリートと実装, コンクリート工学, Vol.57, No.1, pp.71-74, 2019.1
- 4) 梅津真見子, 宮原茂禎, 畑 明仁, 小西正芳: 廃石膏ボードを原料とした合成炭酸カルシウムを添加したコンクリートの基本的品質, コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, 2024

表-4 本稿で示したカーボンリサイクル・コンクリートの特徴

項目	特徴
・圧縮強度	指針案と同様に水結合材比で設計可能
・その他力学特性	指針案と同様に圧縮強度との関係式で推定可能である可能性が高い
・凍結融解抵抗性	指針案と同等
・ASR 抵抗性	優れた ASR 抑制効果を有する
・中性化抵抗性	指針案と同等
・水分浸透抵抗性	高炉セメントより優れる
・塩分浸透抵抗性	指針案よりやや劣るが普通コンクリートより優れる
・乾燥収縮	指針案と同様に示方書予測式を適用できる可能性が高い
・断熱温度上昇	指針案と同等

- 5) 近藤祥太, 松元淳一, 宮原茂禎, 小西正芳: 廃石膏から合成した炭酸カルシウムを添加したコンクリート製品の製造と耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, 2024
- 6) 荻野正貴, 大脇英司: 炭酸カルシウムを利用したカーボンリサイクル・コンクリートの基本性状について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, 2023
- 7) 大脇英司, 加藤優志, 宮原茂禎: カーボンリサイクル・コンクリート「T-eConcrete®/Carbon-Recycle」の社会実装の進展-カーボンネガティブを実現したコンクリートの現状と種々の特徴, 建設機械施工, Vol.76, No.4, 2024.4
- 8) コンクリート工学協会: JCI 規準集 1977-2002 年度, pp.465-467, 2004
- 9) 大友健, 府川徹, 安藤公一, 柳栄治, 廣島明男, 宮澤伸吾: 収縮を抑制した高炉セメント B 種を用いた低発熱コンクリートの特性と実構造物への適用-CO₂排出量削減に寄与できる高炉セメントコンクリートの高性能化-, 大成建設技術研究所報, Vol.38, 2005
- 10) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書, 設計編, 土木学会, pp.38-41 および p.44, 2018
- 11) 平本真也, 大塚勇介, 植村幸一郎, 檀康弘: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの水分浸透性に関する評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 1, 2019
- 12) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書, 設計編, 土木学会, pp.107-108, 2018